中国生态农业学报 2017 年 1 月 第 25 卷 第 1 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jan. 2017, 25(1): 69−77

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160639

郭瑶, 柴强, 殷文, 冯福学, 赵财, 于爱忠. 绿洲灌区小麦免耕秸秆还田对后作玉米产量性能指标的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(1): 69−77

Guo Y, Chai Q, Yin W, Feng F X, Zhao C, Yu A Z. Effect of wheat straw return to soil with zero-tillage on maize yield in irrigated oases[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(1): 69−77

绿洲灌区小麦免耕秸秆还田对后作玉米产量性能指标的影响*

郭 瑶[1], 柴 强[1**], 殷 文[1], 冯福学[2], 赵 财[1], 于爱忠[1]

(1. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室/甘肃农业大学农学院 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学工学院 兰州 730070)

摘 要: 产量性能是决定作物生长发育和产量形成的关键因素, 研究前茬秸秆处理方式对后茬作物产量性能指标的影响, 对于建立高效种植制度、优化栽培措施具有重要指导意义。2009—2012 年, 在甘肃河西绿洲灌区, 通过田间定位试验, 研究了前茬小麦不同秸秆还田和耕作措施(NTSS: 25 cm 高茬收割立茬免耕; NTS: 25 cm 高茬等量秸秆覆盖免耕; TIS: 25 cm 高茬等量秸秆翻耕; CT: 不留茬翻耕对照)对后作玉米产量性能指标的影响, 以期为优化试区玉米种植模式提供依据。结果表明, 与 CT 相比, 前茬小麦秸秆还田降低了后作玉米大喇叭口期之前的叶面积指数(LAI)与光合势(LAD), 但增大了吐丝期之后的 LAI 与 LAD, 延缓了衰老, 以 NTSS、NTS 延缓衰老作用突出; NTSS、NTS 和 TIS 处理玉米全生育期的平均叶面积指数(MLAI)比 CT 分别提高 12.8%、19.1%和 7.0%, 总光合势分别提高 12.9%、18.6%和 6.8%, 免耕秸秆还田(NTSS 和 NTS)提高 MLAI 和 LAD 的效果最好。免耕秸秆还田提高了玉米全生育期的平均净同化率(MNAR), 以 NTSS 提高作用明显, 较 CT 高 10.7%; 但净同化率(NAR)表现为吐丝期之前增大, 吐丝期之后降低。NTSS、NTS 提高了后作玉米的籽粒产量, 比 CT 分别高 13.0%、15.6%, TIS 比 CT 提高 7.9%, NTS 增产效应最大。不同秸秆还田及耕作方式下, 玉米籽粒产量与 MLAI、穗数(EN)、穗粒数(KNE)呈极显著正相关性, 与收获指数(HI)呈显著正相关性, 但与 MNAR 无显著相关性。MLAI、EN、KNE 增加、HI 提高是前茬小麦免耕秸秆还田提高后作玉米产量的主要原因。前茬秸秆免耕还田优化后茬玉米主要产量性能指标的效果最好。因此, 前茬小麦 25 cm 秸秆覆盖免耕还田是绿洲灌区优化后作玉米产量性能指标及获得高产的可行栽培措施。

关键词: 玉米; 免耕; 秸秆还田; 后茬作物; 产量性能; 绿洲灌区

中图分类号: S341 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)01-0069-09

Effect of wheat straw return to soil with zero-tillage on maize yield in irrigated oases*

GUO Yao[1], CHAI Qiang[1**], YIN Wen[1], FENG Fuxue[2], ZHAO Cai[1], YU Aizhong[1]

(1. Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science / Faculty of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Yield capability is a key factor for crop growth and yield formation. The response of yield capability of crops to

* 国家自然科学基金项目(31360323)、国家公益性行业(农业)科研项目(201503125-3)和国家科技支撑计划项目(2012BAD14B10)资助
** 通讯作者: 柴强, 主要从事多熟种植、循环农业研究。E-mail: chaiq@gsau.edu.cn
郭瑶, 主要从事多熟种植、节水农业研究。E-mail: guoyaogsau@126.com
收稿日期: 2016-07-18 接受日期: 2016-09-14

* This study was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (31360323), the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (201503125-3), and the National Key Technology R&D Program of China (2012BAD14B10).
** Corresponding author, E-mail: chaiq@gsau.edu.cn
Received Jul. 18, 2016; accepted Sep. 14, 2016

straw return to soils usually has been important in establishing highly efficient cropping systems and optimizing cultivation practices. A field experiment was carried out in a typically irrigated oasis region in 2009–2012 to determine the effects of yield capability of maize with different treatments of wheat straw return to soil and different tillage operations. The tillage operations included (i) no tillage with straw standing (NTSS), where no tillage was combined with 25 cm length wheat straw standing in the field after wheat harvesting in the previous fall; (ii) no tillage with straw covering (NTS), where no tillage was combined with 25 cm length wheat straw chopped and evenly spread on the soil surface at wheat harvest in the previous fall; (iii) tillage with straw incorporation (TIS), where 25 cm length wheat straw was incorporated into the soil through conventional deep tillage (30 cm) at wheat harvest in the previous fall; and (iv) conventional tillage (as control), where conventional deep (30 cm) plow was done with wheat straw removed from the field. The results showed that compared with the control, wheat straw return treatments reduced leaf area index (LAI) and leaf area duration (LAD) of maize before the large bell mouth stage. However, it increased LAI and LAD of maize after silking, which effectively delayed senescence. No tillage with straw standing and straw covering (NTSS and NTS) had the best effects on senescence delay among all treatments. Mean leaf area index (MLAI) increased by 12.8% under NTSS, 19.1% under NTS and 7.0% under TIS. Similarly, total LAD increased by 12.9% under NTSS, 18.6% under NTS and 6.8% under TIS. Specifically, the increase in MLAI and LAD under NTSS and NTS treatments was the highest. No tillage with straw retention improved mean net assimilation rate (MNAR) of maize growth season, which was 10.7% greater under NTSS treatment than under the control. But NAR of maize increased before silking, and decreased after silking under treatments of no tillage with straw retention, compared with the control. Straw return treatments had higher grain yield than the control, which increased by 13.0% under NTSS, 15.6% under NTS and 7.9% under TIS, with NTS had the best effect on grain yield increase. There was a high significant positive correlation between grain yield and MLAI, ear number (EN) and kernel number per ear (KNE), a significant positive correlation between grain yield and harvest index (HI), but no correlation between grain yield and MNAR. Increased MLAI, EN, KNE and HI were the main reasons for high grain yield of maize under wheat straw return conditions. No tillage with 25 cm length straw mulching over the soil surface (NTS) was the most suitable straw return strategy for optimal yield capability. Based on the results therefore, no-tillage with 25 cm length straw return to soil was recommended as the most feasible cultural method to optimize yield capability of maize ration with wheat in irrigated oasis regions.

Keywords: Maize; No-tillage; Straw return to soil; Succession crop; Yield capability; Irrigated oasis

作物产量是平均叶面积指数、平均净同化率、收获指数、单位面积穗数、穗粒数、粒重等产量性能指标相互补偿协调的结果[1]。在产量潜力提高过程中，群体产量性能参数会相应变化，研究高产作物产量性能参数特征及其形成机制，对于优化作物管理技术具有重要理论和技术指导价值。在影响玉米(*Zea mays*)产量性能指标的诸多因子中，品种[2-3]、耕作措施[4]、播种密度[5]、播种期[6]、水肥条件[7]倍受关注。已有研究证明，创造适宜的土壤水分环境，并配以相应的耕作措施、播种密度可作为优化玉米产量性能指标的调控措施[4-5,7]。大量研究表明，以少免耕作和秸秆还田为主要措施的保护性耕作技术主要通过保持水土、提高作物产量、降低风蚀、水蚀等环境问题而广泛应用于农业生产[8-9]；而后作倒茬通过平衡土壤养分具有稳产、高产，提高农业资源转化率等优势[10-11]。然而，基于少免耕、秸秆还田和后作于一体的技术体系，能否通过优化作物的产量性能指标而获得高产尚少见报道，使得生产实践中缺乏通过优化耕作制度而提高作物产量的理论依据。甘肃河西绿洲灌区光资源丰富、热量适于玉米生产，但连作普遍，连作弊端逐年显现，缺乏集成应用轮作与保护性耕作技术的玉米高产模式与理论。为此，本研究以优化利用小麦(*Triticum aestivum*)茬口为突破口，在不同耕作措施和小麦秸秆还田方式下，探讨提高后作玉米产量性能指标的可行性，以期为优化试区高产高效玉米种植制度提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2009—2012年度在甘肃农业大学绿洲农业科研教学基地(37°30′N, 103°5′E)进行。试验区位于河西走廊东端，属寒温带干旱气候区，年平均气温7.2 ℃，≥0 ℃和≥10 ℃积温分别为 3 513.4 ℃和2 985.4 ℃；日照时数 2 945 h。试区年平均降雨量约156 mm，主要集中在7—9月，年蒸发量约2 400 mm，是典型的绿洲灌溉农业区。小麦、玉米为试区主栽作物，均为一年 1 熟栽培模式，小麦传统栽培中秸秆不还田，每年进行翻耕；玉米普遍连作，每年翻耕，均采用地膜覆盖种植，玉米生产表现出连作病虫害逐年加重，产量、品质下降等问题。

1.2 试验设计

2009 年布置预备试验，建立不同小麦留茬高度

及秸秆还田方式。2010 年度与 2012 年度重复试验并进行相关数据的采集与整理。玉米播种日期分别为 2010 年 4 月 22 日和 2012 年 4 月 20 日，收获日期分别为 2010 年 9 月 28 日和 2012 年 10 月 2 日。供试玉米品种为'武科 2 号'。2010 年度与 2012 年度，玉米播种至收获期降雨量分别为 94.7 mm 和 128.5 mm。

试验设 4 种耕作及秸秆还田处理，3 次重复。2009 年和 2011 年种植小麦，小麦收获期采取 4 种不同收割方式：25 cm 高茬收割立茬免耕(NTSS)、25 cm 高茬等量秸秆覆盖免耕(NTS)、25 cm 高茬等量秸秆翻耕(TIS)，以传统不还田翻耕(CT)为对照；NTS 和 TIS 秸秆还田量为 4 200 $kg\cdot hm^{-2}$。翌年(2010 年和 2012 年)种植玉米，形成小麦–玉米轮作体系。玉米播种密度为 82 500 株$\cdot hm^{-2}$，小区面积 48 m^2。传统不留茬耕作(CT)及高茬等量秸秆翻耕(TIS)处理前茬小麦收获后翻耕(深度为 30 cm)，翌年撒施底肥，然后机械耙耱、人工覆膜；小麦高茬收割立茬免耕(NTSS)与高茬等量秸秆覆盖免耕(NTS)处理前茬小麦收割后免耕，翌年撒施底肥，然后机械旋耕、耙耱、人工覆膜，穴播点种玉米。其他田间管理措施同地方高产田。

施肥、灌溉制度与地方高产田一致，即总施 N 量为 450 $kg\cdot hm^{-2}$，按基肥∶大喇叭口期追肥∶灌浆期追肥=3∶6∶1 分施，追肥时，用穴播枪在距玉米茎秆 10 cm 处打孔，将肥料施入 10 cm 深的孔中，然后埋土即可；施纯 P_2O_5 225 $kg\cdot hm^{-2}$，全作基肥。灌溉制度为冬灌水 120 mm，玉米拔节期、大喇叭口期、抽雄吐丝期、开花期和灌浆期分别灌水 90 mm、75 mm、90 mm、75 mm 和 75 mm。

1.3　测定指标和计算方法

1.3.1　叶面积指数与净同化率

玉米苗期至成熟期，各小区每隔约 20 d(2010 年和 2012 年玉米具体生育时期的取样时间见表 1)用"S"型法选取长势均匀、有代表性的 5 株玉米，先测定每株各叶片的叶长(a_i)和最大叶宽(b_i)，计算叶面积指数(LAI)，然后将所有样品于 105 ℃下杀青 1 h 后，在 80 ℃下烘 24 h 至完全烘干后称其重量，测定其干物质积累量。

表 1　不同年份玉米不同生育时期的取样时间(月-日)

Table 1　The sampling dates (month-day) for maize at different growth stages in 2010 and 2012

年份 Year	苗期 Seeding	拔节期 Jointing	小喇叭口期 Small bell mouth	大喇叭口期 Large bell mouth	吐丝期 Silking	灌浆期 Filling	蜡熟期 Doughing	完熟期 Full-ripening
2010	05-06	05-26	06-10	06-30	07-20	08-10	09-05	09-25
2012	05-05	05-25	06-09	06-27	07-17	08-11	09-03	09-26

叶面积指数由下式求得：

$$\mathrm{LAI} = 0.75 \times P \times \sum_{i=1}^{n}(a_i \times b_i)$$

式中：0.75 为校正系数，P 为玉米种植密度，a 和 b 分别为叶片的长和宽，i 为叶片个数。

然后由下式求得光合势(LAD)：

$$\mathrm{LAD} = \sum_{i=1}^{n}(\mathrm{LAI}_i \times D_i) \quad (1)$$

式中：LAI_i 为第 i 个生育阶段的平均叶面积，D_i 为第 i 个生育阶段所持续的时间。

净同化率(NAR：$g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$)表示单位叶面积在单位时间内的干物质增长量，由下式求得：

$$\mathrm{NAR} = \frac{\ln L_2 - \ln L_1}{L_2 - L_1} \times \frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

式中：L_2、L_1 分别为 t_2、t_1 时间的叶面积，W_1 为时间 t_1 时的干重，W_2 为时间 t_2 时的干重。

根据张宾等[12]的方法计算平均叶面积指数(MLAI)，根据侯玉虹等[13]的方法计算平均净同化率(MNAR)。

1.3.2　产量及产量性状

每小区单独收获计产(除去取样植株所占面积)，测定单位面积穗数(EN)，玉米随机选取 10 穗进行考种，测定穗粒数(KNE)、千粒重(TKW)等产量性能指标。

1.4　数据统计

数据用 Microsoft Excel 2007 整理汇总，用 SPSS 17.0 进行方差分析、显著性检验及相关性分析。

2　结果与分析

2.1　不同耕作及秸秆还田方式下后作玉米叶面积指数及光合势动态

2.1.1　全生育期平均叶面积指数(LAI)及叶面积指数动态

就全生育期平均叶面积指数(MLAI)而言(表 2)，秸秆还田处理 NTSS、NTS、TIS 较 CT 显著提高了 MLAI，分别高 11.7%~14.0%、16.8%~21.5%和 6.5%~7.4%(P<0.05)，以免耕还田 NTSS、NTS 提高 MLAI 作用较大，比 TIS 分别高 4.9%~6.2%、9.6%~13.1% (P<0.05)，以 NTS 提高 MLAI 优势最为突出。

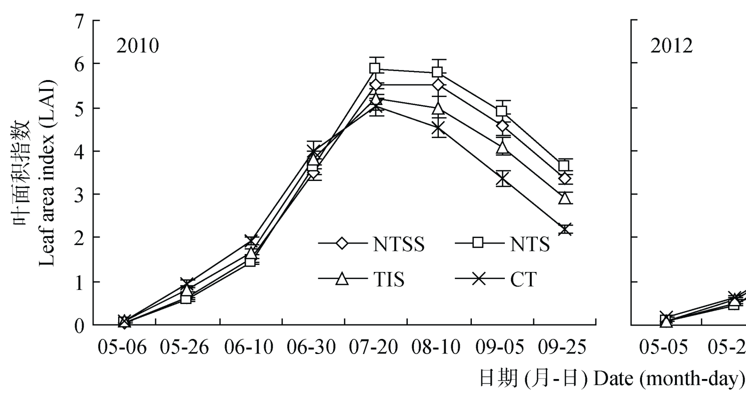
表 2 不同耕作及秸秆还田方式下玉米全生育期平均叶面积指数、总光合势及净同化率差异

Table 2 Mean leaf area index, total leaf area duration and net assimilation rate of maize growth season under different tillage and wheat straw returning patterns

年份 Year	处理 Treatment	平均叶面积指数 Mean leaf area index	总光合势 Total leaf area duration	平均净同化率 Net assimilation rate ($g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)
2010	NTSS	3.09±0.027a	490.8±22.64ab	6.84±0.079a
	NTS	3.23±0.022a	513.4±19.49a	6.78±0.038ab
	TIS	2.95±0.029b	467.9±24.73bc	6.68±0.068ab
	CT	2.77±0.040c	441.3±29.57c	6.43±0.092b
2012	NTSS	3.18±0.029ab	494.0±26.48b	8.07±0.068a
	NTS	3.39±0.024a	521.1±20.17a	7.11±0.041ab
	TIS	2.99±0.033b	463.5±28.46c	7.38±0.087ab
	CT	2.79±0.036c	431.3±35.06d	7.02±0.105b

NTSS、NTS、TIS 和 CT 分别为小麦留 25 cm 高茬收割立茬免耕、小麦留 25 cm 高茬等量秸秆覆盖免耕、小麦留 25 cm 高茬等量秸秆翻耕和传统不还田翻耕(对照)。不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。NTSS, NTS, TIS and CT are treatments of no tillage with 25 cm wheat straw standing, no tillage with 25 cm wheat straw covering, no tillage with 25 cm wheat straw incorporation, and conventional tillage. Different letters indicate significant differences among the treatments at 0.05 probability level.

前茬小麦免耕秸秆还田降低了后作玉米生育前期的 LAI, 但保持了生育后期较高的 LAI(图 1)。2010 年度与 2012 年度, 与 CT 相比, NTSS、NTS 处理在玉米大喇叭口期(2010 年: 6 月 30 日; 2012 年: 6 月 27 日)之前的 LAI 分别显著低 26.2%~31.1%与 17.8%~30.7%, TIS 低 11.2%~13.6%(P<0.05); 大喇叭口期至吐丝期(2010 年: 6 月 30 日—7 月 20 日; 2012 年: 6 月 27 日—7 月 17 日), NTS 比 CT 显著高 5.0%~14.3%(P<0.05); 吐丝期(2010 年: 7 月 20 日; 2012 年: 7 月 17 日)之后, NTSS、NTS 处理的 LAI 比 CT 显著高 33.5%~41.4%, TIS 比 CT 显著高 15.7%~41.4%, 其中 NTS 具有较高的 LAI, 较 CT 高 36.0%~41.4%, 较 TIS 高 17.6%~19.1%(P<0.05), 说明 NTS 具有良好的保持玉米生育后期光合源的功能。



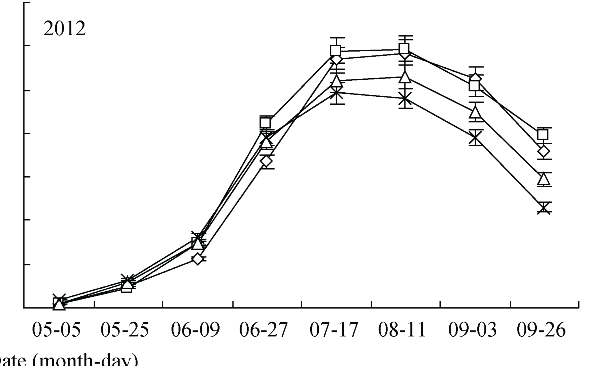


图 1 不同耕作及秸秆还田方式下玉米叶面积指数变化

Fig. 1 Dynamic changes of leaf area index of maize populations under different tillage and straw returing patterns

NTSS、NTS、TIS 和 CT 分别为小麦留 25 cm 高茬收割立茬免耕、小麦留 25 cm 高茬等量秸秆覆盖免耕、小麦留 25 cm 高茬等量秸秆翻耕和传统不还田翻耕(对照)。NTSS, NTS, TIS and CT are treatments of no tillage with 25 cm wheat straw standing, no tillage with 25 cm wheat straw covering, no tillage with 25 cm wheat straw incorporation, and conventional tillage.

2.1.2 全生育期总光合势(LAD)及其动态

前茬小麦免耕秸秆还田可显著提高后作玉米的总光合势, NTS 提高 LAD 的效果最为显著(表 2)。两个试验年份中, 免耕还田(NTSS、NTS)后作玉米全生育期总光合势比 CT 分别高 11.2%~14.5%、16.3%~20.8%, 翻耕还田(TIS)比 CT 高 6.0%~7.5%, 均达到显著水平(P<0.05)。3 种秸秆还田处理中, NTSS、NTS 比 TIS 分别高 4.9%~6.6%、9.7%~12.4%, 差异显著(P<0.05)。

玉米大喇叭口期(2010 年: 6 月 30 日; 2012 年: 6 月 27 日)之前, NTSS、NTS 处理玉米的光合势均小于 CT(图 2), 降低比例分别达 5.9%~21.4%、20.1%~23.1%(P<0.05)。大喇叭口期至吐丝期(2010 年: 6 月 30 日—7 月 20 日; 2012 年: 6 月 27 日—7 月 17 日), NTSS、TIS 处理的光合势与 CT 相似, 但 NTS 比 CT 高 4.9%~14.3%(P<0.05)。吐丝期(2010 年: 7 月 20 日; 2012 年: 7 月 17 日)之后, NTSS、NTS 的 LAD 比 CT 分别高 26.3%~28.1%、29.7%~33.7%, TIS 比 CT

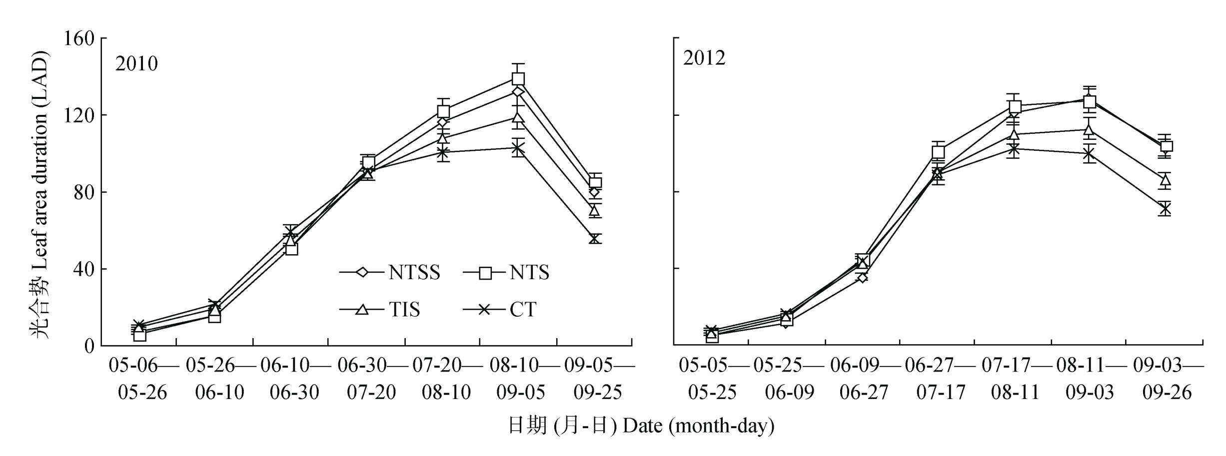


图 2　不同耕作及秸秆还田方式下玉米各生育阶段的光合势差异

Fig. 2　Leaf area duration of maize in each growth stage under different tillage and straw returning patterns

NTSS、NTS、TIS 和 CT 分别为小麦留 25 cm 高茬收割立茬免耕、小麦留 25 cm 高茬等量秸秆覆盖免耕、小麦留 25 cm 高茬等量秸秆翻耕和传统不还田翻耕(对照)。NTSS, NTS, TIS and CT are treatments of no tillage with 25 cm wheat straw standing, no tillage with 25 cm wheat straw covering, no tillage with 25 cm wheat straw incorporation, and conventional tillage.

高 12.7%~14.0%, 差异显著(P<0.05), 即免耕秸秆还田处理对玉米光合势的提高作用较大, 以 NTS 提高作用最明显, 比 TIS 高 15.1%~17.3%。总体来说, 前茬小麦秸秆覆盖免耕减小了玉米大喇叭口期(2010 年: 6 月 30 日; 2012 年: 6 月 27 日)之前的光合势, 增大了吐丝期(2010 年: 7 月 20 日; 2012 年: 7 月 17 日)之后的光合势, 以 NTS 调控效应最明显, 为后茬玉米高产奠定了基础。

2.1.3　净同化率(NAR)的动态特征

前茬小麦免耕秸秆还田提高了后作玉米生育前期的 NAR, 但降低了生育后期的 NAR(图 3)。两年度最大 NAR 出现在小喇叭口期至吐丝期(2010 年: 6 月 10 日—7 月 20 日; 2012 年: 6 月 9 日—7 月 17 日), 2010 年, 翻耕处理 TIS、CT 的最大 NAR 出现先于免耕处理 NTSS、NTS, 而 2012 年均出现在小喇叭口期至大喇叭口期(6 月 10—30 日)。小喇叭口期至大喇叭口期(2010 年: 6 月 10—30 日; 2012 年: 6 月 9—27 日)的 NAR 年际间有差异, 但以 CT 最低; 大喇叭口期至吐丝期(2010 年: 6 月 30 日—7 月 20 日; 2012 年: 6 月 27 日—7 月 17 日), 2010 年表现为 NTSS、NTS 高于 TIS、CT, 分别提高 21.0%~31.7%、38.2%~50.4%, 2012 年 NTSS 比 CT 高 10.2%, 均达显著性差异(P<0.05)。总之, 吐丝期(2010 年: 7 月 20 日; 2012 年: 7 月 17 日)之前, NTSS、NTS 较 CT 提高 NAR, 分别显著高 12.0%~20.3%、4.4%~16.8%, TIS 较 CT 高 8.0%~9.1%(P<0.05), 以免耕秸秆还田提高作用突出; 相反, 吐丝期(2010 年: 7 月 20 日; 2012 年: 7 月 17 日)之后, 与 CT 相比, 秸秆还田降低了 NAR, 其中 NTSS、NTS 分别低 7.0%~8.4%、11.3%~23.9%, TIS 低 6.9%~11.0%(P<0.05), 且以 NTS 降低幅度最大。全生育期平均净同化率(MNAR)NTSS 显著高于 CT, 提高比例达 6.4%~15.0%(P<0.05)(表 2)。

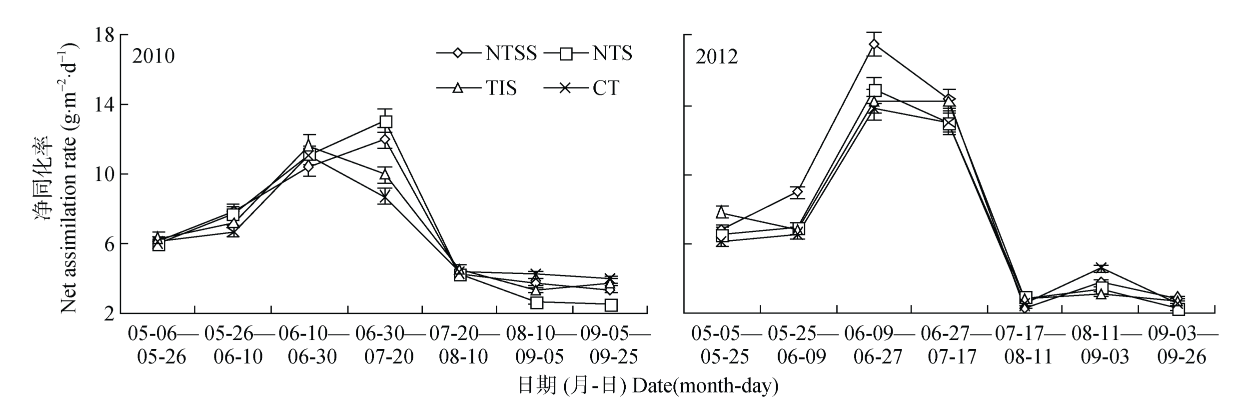


图 3　不同耕作及秸秆还田方式下玉米净同化率变化

Fig. 3　Dynamic changes of net assimilation rate of maize under different tillage and straw returning patterns

NTSS、NTS、TIS 和 CT 分别为小麦留 25 cm 高茬收割立茬免耕、小麦留 25 cm 高茬等量秸秆覆盖免耕、小麦留 25 cm 高茬等量秸秆翻耕和传统不还田翻耕(对照)。NTSS, NTS, TIS and CT are treatments of no tillage with 25 cm wheat straw standing, no tillage with 25 cm wheat straw covering, no tillage with 25 cm wheat straw incorporation, and conventional tillage.

2.2 不同秸秆处理方式下后作玉米的产量表现与产量构成因素

与 CT 相比，前茬小麦秸秆还田显著提高了后作玉米的籽粒产量(表 3)。两个试验年度，NTSS、NTS 比 CT 分别高 12.0%~13.9%、13.7%~17.5%，TIS 比 CT 高 4.4%~11.3%，差异显著(P<0.05)，免耕秸秆还田增产效果明显。以 NTS 处理的籽粒产量最高，分别达 13 470 kg·hm^{-2} 与 13 247 kg·hm^{-2}，较 TIS 高 5.7%~9.0%(P<0.05)。由此说明，前茬小麦秸秆 25 cm 高茬等量覆盖结合免耕有利于提高玉米籽粒产量。

小麦秸秆还田明显提高了后作玉米的单位面积成穗数(EN)、穗粒数(KNE)及千粒重(TKW)(表 3)。与 CT 相比，NTSS、NTS 的 EN 分别高 8.7%~12.8%与 18.1%~21.0%(P<0.05)。NTSS、NTS 较 CT 提高了 KNE，提高比例分别为 60.6%~64.6%、63.7%~67.8%，TIS 较 CT 高 41.0%~45.8%，以 NTS 提高 KNE 幅度较大，比 TIS 高 15.0%~16.1%(P<0.05)。NTSS、NTS 较 CT 提高了 TKW，分别高 4.2%~7.8%、8.7%~9.6%，以 NTS 提高 TKW 作用较大，比 TIS 高 5.0%~5.6%(P<0.05)。总之，3 种小麦秸秆还田处理中，均以 NTS 产量构成因素最高，是玉米获得高产的基础。

前茬小麦秸秆还田提高了后作玉米光合产物向穗部的转化(表 3)。两年度，均有 NTS 的收获指数显著高于 CT，提高比例为 5.4%~8.4%(P<0.05)，说明 25 cm 高茬秸秆覆盖结合免耕是提高玉米光合产物转化的适宜茬口管理措施。

表 3 不同耕作及秸秆还田方式下玉米产量及产量构成因素

Table 3 Grain yield and yield components of maize under different tillage and straw returning patterns

年份 Year	处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield (kg·hm^{-2})	收获指数 Harvest index	产量构成因素 Yield component		
				穗数 Ear number (ears·hm^{-2})	穗粒数 Kernel number per ear	千粒重 1000-kernal weight (g)
2010	NTSS	13 054±195ab	0.439±0.018ab	79 302±1 646b	534.5±17.0a	343.5±12.3a
	NTS	13 470±177a	0.450±0.013a	85 040±1 009a	544.8±14.7a	349.3±14.2a
	TIS	12 760±137b	0.455±0.015a	74 173±1 572c	469.2±13.6b	330.9±16.3ab
	CT	11 460±151c	0.427±0.013b	70 295±1 453d	332.8±11.4c	318.6±13.2b
2012	NTSS	13 050±439a	0.464±0.016a	80 351±1 500ab	542.4±14.1a	353.5±14.2a
	NTS	13 247±208a	0.468±0.015a	87 294±1 452a	553.0±14.0a	358.4±11.6a
	TIS	12 157±494b	0.442±0.017b	77 058±1 513b	480.7±15.4b	341.3±11.9ab
	CT	11 650±247c	0.432±0.015b	73 894±1 572b	329.6±16.4c	329.6±12.2b

NTSS、NTS、TIS 和 CT 分别为小麦留 25 cm 高茬收割立茬免耕、小麦留 25 cm 高茬等量秸秆覆盖免耕、小麦留 25 cm 高茬等量秸秆翻耕和传统不还田翻耕(对照)。不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。NTSS, NTS, TIS and CT are treatments of no tillage with 25 cm wheat straw standing, no tillage with 25 cm wheat straw covering, no tillage with 25 cm wheat straw incorporation, and conventional tillage. Different letters indicate significant differences among the treatments at 0.05 probability level.

2.3 不同耕作及秸秆还田方式下籽粒产量与产量性能指标的相关性

由表 4 可以看出，玉米籽粒产量与 MLAI、EN、KNE 呈极显著正相关，与 HI、TKW 呈显著正相关，但与 MNAR 无显著相关。说明小麦秸秆还田可通过提高叶面积指数、收获指数来提高物质生产的稳定性及干物质的转移效率，从而提高籽粒产量；也可通过优化耕作方式提高单位面积穗数、穗粒数的正效应来提高籽粒产量。

3 讨论

3.1 前茬小麦秸秆免耕还田对后作玉米叶面积指数、光合势的影响

作物良好的生长发育需要适宜的土壤温度与水分，土壤温度与水分的变化与根系功能、光合特性及产量形成等作物生长发育密切相关[14-15]，通过耕作方式及覆盖措施调控农田土壤水热特性对作物生长发育具有重要作用[16]。作物叶面积指数(LAI)及光

表 4 不同耕作及秸秆还田方式下籽粒产量与产量性能指标的相关性分析

Table 4 Correlation coefficient between grain yield and parameters of yield for different tillage and straw returning patterns

参数 Parameter	年份 Year	产量性能指标 Parameters of yield capability					
		平均叶面积指数 Mean LAI	平均净同化率 Mean net assimilation rate	收获指数 Harvest index	单位面积穗数 Ear number	穗粒数 Kernel number per ear	千粒重 1000-kernel weight
籽粒产量 Grain yield	2010	0.835**	0.515	0.618*	0.832**	0.983**	0.737*
	2012	0.861**	0.402	0.884**	0.832**	0.909**	0.708*

与*分别表示 0.01 与 0.05 概率水平下显著。 and * indicate significant correlations at 0.01 and 0.05 probability levels, respectively.

合势(LAD)是群体结构的重要量化指标，是反映作物长势与预测作物产量的重要农学参数[17]。创建合理的群体结构对提高作物产量具有重要作用，采用适宜的栽培技术是调节群体结构的重要措施[18]，前期扩源后期保持庞大的绿色叶面积是作物高产的基础[19]。本研究发现，前茬免耕秸秆还田降低了后作玉米大喇叭口期之前的 LAI 与 LAD，保持了吐丝期之后较高的 LAI 与 LAD，以秸秆免耕覆盖还田(NTS)的效应最为突出，这是因为免耕秸秆覆盖还田前期低温利于玉米根系生长[20]，不利于地上部生长发育，造成较低的光合源，而吐丝期之后，传统地膜覆盖在玉米开花灌浆期造成玉米根区极端高的土壤温度[21]，以及生育前期水分养分过度消耗，后期养分不足，导致后期根系及叶片发生早衰，光合源相对较小，而免耕秸秆还田后期适宜的土壤温度，以及玉米生育前期生长慢，养分消耗少，实现养分“错期分配”，满足玉米生育后期旺盛生长的养分需求，提高了吐丝期之后的叶面积与光合势，说明免耕秸秆还田玉米增产主要发生在生育后期。前人研究发现，高产玉米吐丝后光合势占总光合势的 50%以上[2]。本研究中前茬小麦秸秆还田处理玉米吐丝后光合势占总光合势的 63.1%~ 70.9%，以前茬小麦免耕秸秆覆盖还田(NTS)玉米吐丝后光合势占总光合势的比例最大，达 66.7%~70.9%，为玉米增产奠定了基础，其高产效应已被证实[22]。

3.2　前茬小麦秸秆免耕还田对后作玉米净同化率影响

净同化率是衡量作物光合能力的重要指标之一。大量研究表明，玉米一生中净同化率呈“双峰型”曲线变化，峰值分别出现在大喇叭口期和灌浆期，谷值出现在开花授粉期[23]，利用地膜覆盖、残茬覆盖等不同覆盖方式对玉米的研究得到了相同结论[24]。同时，姚刚等[25]研究地膜对春玉米净同化率的影响后发现，净同化率在玉米出苗后 50 d 左右达到峰值，与本研究结果一致。另有研究表明，吐丝期是春玉米群体由营养生长过渡到生殖生长时期，该时期植株形态发育完全，叶面积最高，吐丝期之后净同化率却最低[26]。从群体叶片发育角度分析认为，春玉米群体叶面积指数的高低会影响净同化率的变化，叶面积系数达到高峰期，叶片相互遮蔽，群体受光面积不再随着玉米叶面积的增加而增加，净同化率降低[27]。本研究表明，前茬小麦秸秆免耕还田提高了玉米吐丝期之前的净同化率(NAR)，相反降低了吐丝期之后的 NAR。这是因为通过优化耕作措施，小麦秸秆免耕还田前期低温延缓玉米生长发育，后期适宜的土壤温度使得玉米表现出明显的恢复生长，群体拥挤程度加大，植株中下部叶片光合速率降低，净同化率降低。另一可能原因是净同化率随着平均叶面积指数的变化而变化，是叶面积与干物质重量共同影响的光合生理指标，受外界生态环境影响明显，吐丝期至灌浆期正是全年气温最高季节，植物新陈代谢旺盛，呼吸消耗多，积累少，导致净同化率降低[28]。

3.3　前茬小麦秸秆免耕还田对后作玉米产量与性能指标的影响

作物产量由平均叶面积指数、平均净同化率、单位面积穗数、穗粒数和粒重共同决定[1]。对于禾谷类作物而言，各产量性能指标间的协调发展是实现高产的基础。传统玉米栽培采用地膜覆盖增产的主要原因是玉米穗粒数的增加，主要表现在抽雄及雌穗分化发育阶段[29]。条带深松耕作方式可增加穗数、穗粒数、千粒重、干物质积累量、群体平均叶面积指数、平均净同化率，通过产量性能参数的差异补偿机制实现密植夏玉米增产[30]。本研究发现，前茬小麦秸秆还田提高了后作玉米的穗数、穗粒数及粒重，其中免耕还田处理的穗数明显高于其他处理，主要是提高了玉米的双穗率[31]，一方面由于其品种的遗传特性所决定，另一方面可能因为秸秆免耕还田明显提高了土壤水分含量，降低了开花吐丝期土壤温度，为玉米穗部形成及灌浆奠定了基础[32]；而传统耕作处理的穗数明显低于秸秆还田，传统耕作成穗率较低所致，可能因为玉米开花吐丝期，较低的土壤含水量与较高的土壤温度[20]，降低了生育后期的叶面积指数及光合势，减弱光合速率，从而降低成穗率。通过籽粒产量与其产量性能指标的相关分析表明，免耕还田提高玉米产量主要因为平均叶面积指数、穗数、穗粒数、粒重及收获指数的提高。25 cm 秸秆免耕还田可以作为区域玉米高产栽培技术。

4　结论

前茬小麦秸秆还田可减小后作玉米大喇叭口期之前的叶面积指数、光合势，增大吐丝期之后的叶面积指数、光合势，延缓衰老，以免耕秸秆还田处理大喇叭口期之前降低作用与吐丝期之后延缓衰老作用突出。与 CT 相比，NTSS、NTS 平均叶面积指数(MLAI)及总光合势(LAD)分别高 11.7%~14.0%、16.8%~21.5%与 11.2%~14.5%、16.3%~20.8%，TIS 分别高 6.5%~7.4%与 6.0%~7.5%，以 NTS 提高 MLAI 与总 LAD 幅度最大。前茬小麦免耕秸秆还田提高了后作玉米生育前期的净同化率(NAR)，但降低了

生育后期的 NAR，以 NTSS 调控作用最突出，全生育期的平均净同化率(MNAR)高 6.4%~15.0%。前茬小麦秸秆免耕还田有利于后作玉米产量的提高，其中 NTS 的增产效果较大，比 CT 增产 13.7%~17.5%，比 TIS 增产 5.7%~9.0%，其高产主要归因于 MLAI、穗数、穗粒数、收获指数的提高。因此，前茬小麦 25 cm 秸秆覆盖免耕还田是绿洲灌区优化后作玉米产量性能指标及获得高产的可行栽培措施。

参考文献 References

[1] 赵明, 李建国, 张宾, 等. 论作物高产挖潜的补偿机制[J]. 作物学报, 2006, 32(10): 1566–1573
Zhao M, Li J G, Zhang B, et al. The compensatory mechanism in exploring crop production potential[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(10): 1566–1573

[2] 陈传永, 董志强, 赵明, 等. 低温冷凉地区超高产春玉米群体生长分析研究[J]. 玉米科学, 2007, 15(3): 75–79
Chen C Y, Dong Z Q, Zhao M, et al. Researches of analysis and growth on spring maize with super-high yield in cold region[J]. Journal of Maize Sciences, 2007, 15(3): 75–79

[3] 杨今胜, 王永军, 张吉旺, 等. 三个超高产夏玉米品种的干物质生产及光合特性[J]. 作物学报, 2011, 37(2): 355–361
Yang J S, Wang Y J, Zhang J W, et al. Dry matter production and photosynthesis characteristics of three hybrids of maize (*Zea mays* L.) with super-high-yielding potential[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(2): 355–361

[4] 李立娟, 崔彦宏, 李琦, 等. 条深旋耕作方式对早春玉米产量性能的影响[J]. 作物杂志, 2011(5): 96–99
Li L J, Cui Y H, Li Q, et al. Effect on yield performance of early spring maize in strip deep tillage[J]. Crops, 2011(5): 96–99

[5] 陈传永, 侯玉虹, 孙锐, 等. 密植对不同玉米品种产量性能的影响及其耐密性分析[J]. 作物学报, 2010, 36(7): 1153–1160
Chen C Y, Hu Y H, Sun R, et al. Effects of planting density on yield performance and density-tolerance analysis for maize hybrids[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(7): 1153–1160

[6] 李向岭, 李从锋, 葛均筑, 等. 播期和种植密度对玉米产量性能的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(2): 95–100
Li X L, Li C F, Ge J Z, et al. Effects of planting date and planting density on yield performance of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(2): 95–100

[7] 张国桥, 王静, 刘涛, 等. 水肥一体化施磷对滴灌玉米磷素、磷素营养及磷肥利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1103–1109
Zhang G Q, Wang J, Liu T, et al. Effect of water and P fertilizer coupling on corn yield, P uptake, and P utilization efficiency with drip irrigation in a calcareous soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2014, 20(5): 1103–1109

[8] Monneveux P, Quillérou E, Sanchez C, et al. Effect of zero tillage and residues conservation on continuous maize cropping in a subtropical environment (Mexico)[J]. Plant and Soil, 2006, 279(1/2): 95–105

[9] Sun H Y, Shao L W, Liu X W, et al. Determination of water consumption and the water-saving potential of three mulching methods in a jujube orchard[J]. European Journal of Agronomy, 2012, 43: 87–95

[10] Głąb T, Ścigalska B, Łabuz B. Effect of crop rotation on the root system morphology and productivity of triticale (× *Triticosecale* Wittm)[J]. The Journal of Agricultural Science, 2014, 152(4): 642–654

[11] Grandy A S, Porter G A, Erich M S. Organic amendment and rotation crop effects on the recovery of soil organic matter and aggregation in potato cropping systems[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(4): 1311–1319

[12] 张宾, 赵明, 董志强, 等. 作物高产群体 LAI 动态模拟模型的建立与检验[J]. 作物学报, 2007, 33(4): 612–619
Zhang B, Zhao M, Dong Z Q, et al. Establishment and test of LAI dynamic simulation model for high yield population[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(4): 612–619

[13] 侯玉虹, 陈传永, 郭志强, 等. 作物高产群体干物质积累动态模型的构建及生长特性分析[J]. 玉米科学, 2008, 16(6): 90–95
Hou Y H, Chen C Y, Guo Z Q, et al. Establishment of dry matter accumulation dynamic simulation model and analysis of growth characteristic for high-yielding population of spring maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(6): 90–95

[14] 贾志红, 易建华, 孙在军. 不同覆盖物对烤烟根温及生长和生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2075–2078
Jia Z H, Yi J H, Sun Z J. Effects of different mulches on rhizosphere temperature, growth, and physiological properties of flue-cured tobacco[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(11): 2075–2078

[15] 杜太生, 康绍忠, 胡笑涛, 等. 根系分区交替滴灌对棉花产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(10): 2061–2068
Du T S, Kang S Z, Hu X T, et al. Effect of alternate partial root-zone drip irrigation on yield and water use efficiency of cotton[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(10): 2061–2068

[16] 殷文, 陈桂平, 柴强, 等. 前茬小麦秸秆处理方式对河西走廊地膜覆盖玉米农田土壤水热特性的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(15): 2898–2908
Yin W, Chen G P, Chai Q, et al. Responses of soil water and temperature to previous wheat straw treatments in plastic film mulching maize field at Hexi Corridor[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(15): 2898–2908

[17] 张晓艳, 杜吉到, 郑殿峰, 等. 大豆不同群体叶面积指数及干物质积累与产量的关系[J]. 中国农学通报, 2006, 22(11): 161–163
Zhang X Y, Du J D, Zheng D F, et al. Studies on the relationship between yield and leaf area index and their dry matter accumulation dynamic on the different population[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(11): 161–163

[18] 李向岭, 李从锋, 侯玉虹, 等. 不同播期夏玉米产量性能动态指标及其生态效应[J]. 中国农业科学, 2012, 45(6): 1074–1083
Li X L, Li C F, Hou Y H, et al. Dynamic characteristics of summer maize yield performance in different planting dates

and its effect of ecological factors[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(6): 1074–1083

[19] 吕丽华, 陶洪斌, 夏来坤, 等. 不同种植密度下的夏玉米冠层结构及光合特性[J]. 作物学报, 2008, 34(3): 447–455
Lü L H, Tao H B, Xia L K, et al. Canopy structure and photosynthesis traits of summer maize under different planting densities[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(3): 447–455

[20] 刘立晶, 高焕文, 李洪文. 玉米–小麦一年两熟保护性耕作体系试验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 70–73
Liu L J, Gao H W, Li H W. Conservation tillage for corn-wheat two crops a year region[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(3): 70–73

[21] Bu L D, Zhu L, Liu J L, et al. Source-sink capacity responsible for higher maize yield with removal of plastic film[J]. Agronomy Journal, 2013, 105(3): 591–598

[22] 殷文, 冯福学, 赵财, 等. 小麦秸秆还田方式对轮作玉米干物质累积分配及产量的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(5): 751–757
Yin W, Feng F X, Zhao C, et al. Effects of wheat straw returning patterns on characteristics of dry matter accumulation, distribution and yield of rotation maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(5): 751–757

[23] 陈国平. 玉米的干物质生产与分配[J]. 玉米科学, 1994, 2(1): 48–53
Chen G P. Dry matter production and distribution of maize[J]. Maize Science, 1994, 2(1): 48–53

[24] 付国占, 李潮海, 王俊忠, 等. 残茬覆盖与耕作方式对夏玉米光合产物生产与分配的影响[J]. 华北农学报, 2005, 20(3): 62–66
Fu G Z, Li C H, Wang J Z, et al. Effects of stubble mulch and tillage management on assimilating production and distribution in summer maize[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2005, 20(3): 62–66

[25] 姚刚, 张胜, 王圣瑞, 等. 地膜覆盖对春玉米光合性能和干物质累积的影响[J]. 内蒙古农业大学学报, 2000, 21(S1): 153–156
Yao G, Zhang S, Wang S R, et al. The effect of film-covered on photosynthetic function and dry matter accumulation of spring maize[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2000, 21(S1): 153–156

[26] 侯玉虹, 陈传永, 胡小凤, 等. 春玉米群体净同化率(NAR)动态变化特征及定量化分析[J]. 玉米科学, 2012, 20(5): 65–70
Hou Y H, Chen C Y, Hu X F, et al. NAR dynamic characteristics and quantitative analysis for high-yielding population of spring maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(5): 65–70

[27] Rajcan I, Tollenaar M. Source: Sink ratio and leaf senescence in maize: Ⅱ. Nitrogen metabolism during grain filling[J]. Field Crops Research, 1999, 60(3): 255–265

[28] Garai A K, Datta J K. Influence of plant growth regulators on growth, morpho-physiological characters and yield of summer sesame (*Sesamum indicum* L. cv. Rama) under moisture stress[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 1999, 21(3): 277–281

[29] 卜玉山, 苗果园, 邵海林, 等. 对地膜和秸秆覆盖玉米生长发育与产量的分析[J]. 作物学报, 2006, 32(7): 1090–1093
Bu Y S, Miao G Y, Shao H L, et al. Analysis of growth and development and yield of corn mulched with plastic film and straw[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(7): 1090–1093

[30] 侯海鹏, 丁在松, 马玮, 等. 条带深松耕作方式对密植夏玉米产量性能的影响[J]. 玉米科学, 2015, 23(6): 71–75
Hou H P, Ding Z S, Ma W, et al. Effect of strip sub-soiling tillage system on summer maize yield performance in high planting density[J]. Journal of Maize Sciences, 2015, 23(6): 71–75

[31] 殷文, 赵财, 于爱忠, 等. 秸秆还田后少耕对小麦/玉米间作系统中种间竞争和互补的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(4): 633–641
Yin W, Zhao C, Yu A Z, et al. Effect of straw returning and reduced tillage on interspecific competition and complementation in wheat/maize intercropping system[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(4): 633–641

[32] 王维钰, 乔博, Akhtar K, 等. 免耕条件下秸秆还田对冬小麦–夏玉米轮作系统土壤呼吸及土壤水热状况的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(11): 2136–2152
Wang W Y, Qiao B, Akhtar K, et al. Effects of straw returning to field on soil respiration and soil water heat in winter wheat-summer maize rotation system under no tillage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(11): 2136–2152